

空间业务部

空间网络之间有害干扰概率的计算 (C/I比)

1 引言

一主管部门若不能成功完成协调可以请求无线电通信局根据第**11.32A**款的规定审查有害干扰的概率。若不能成功完成根据第**9.7**款进行的协调，无线电通信局使用《程序规则》B部分第B3节中描述的单入载波干扰比(C/I)法¹来评估有害干扰的概率。

在该方法中，在考虑ITU-R S.740建议书的几何因素后，计算载波干扰比C/I，并使用该计算中要考虑的干扰功率部分的调整因子。然后把调整后的C/I值与所需C/I值相比较以估算有害干扰的概率。所需的C/I值由目标C/N值得出，数字载波的K值一般为12.2（或在其他一些情况下为14 dB），分别对应于总噪声功率6%（或4%）的最大可允许干扰。

单入C/I算法也广泛应用于各主管部门对卫星网络进行协调时的干扰评估。

2 载噪比(C/N)

链路预算指的是信号从链路一端行至另一端经历的增益和损耗。链路预算用于设计通信链路，要考虑到各种链路目标，如服务类型、目标服务区、传输速率、链路可用性和天线大小要求等。因此，当提交卫星备案文件给无线电通信局时，通知中的数据将来自所需链路目标的链路预算，要满足所需的载噪比(C/N)，这是衡量链路性能的一种方法。

2.1 计算C/N

下图给出了一个典型的卫星通信链路，由一个上行链路、一个下行链路和计算C/N比所需的参数组成。

¹ WRC-15通过了第**762**号决议，对于该决议提及的某些情况，使用功率通量密度标准代替C/I方法。

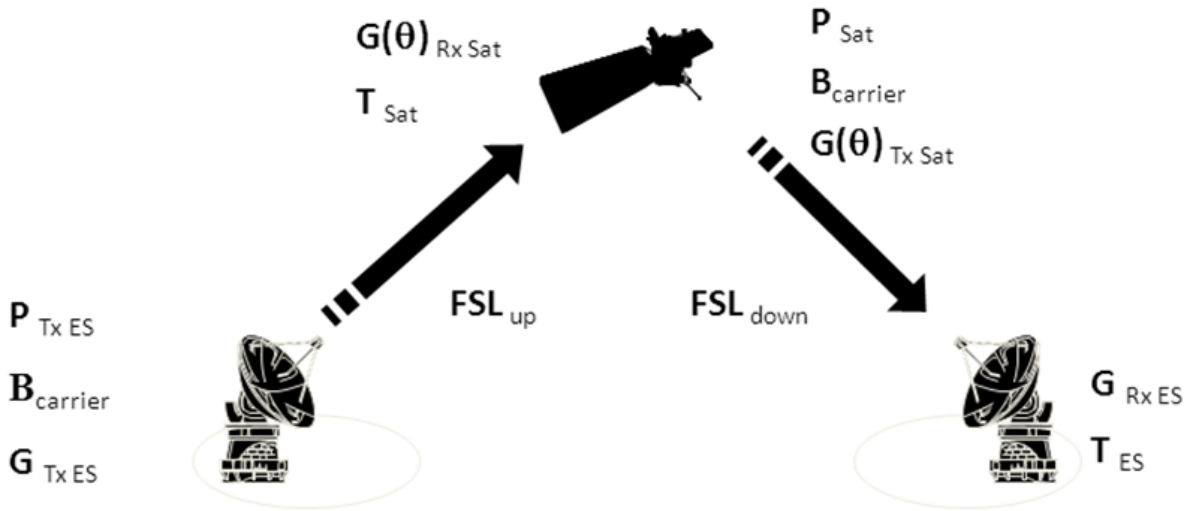


图1 – 卫星通信链路

载噪比 (C/N) 公式表示如下:

$$(C/N)_{up} = EIRP_{Tx ES} - FSL_{up} + (G(\theta)/T)_{RxSat} - B_{carrier} - k \text{ (dB)} \quad [1]$$

$$(C/N)_{up} = P_{Tx ES} + G_{Tx ES} - FSL_{up} + G(\theta)_{RxSat} - (T_{Sat} + B_{carrier} + k) \text{ (dB)} \quad [2]$$

其中:

$$C_{up} = P_{Tx ES} + G_{Tx ES} - FSL_{up} + G(\theta)_{RxSat} \text{ (dBW)} \quad [3]$$

$P_{Tx ES}$ = 发射地球站功率 (dBW)

$G_{Tx ES}$ = 发射地球站增益 (dBi)

FSL_{up} = 上行链路中的自由空间损耗 (dB)

$G(\theta)_{RxSat}$ = 对于发射地球站的接收卫星增益 (dBi)

T_{Sat} = 卫星接收系统噪声温度 (dBK)

$B_{carrier}$ = 载波带宽 (dBHz)

K = 玻尔兹曼常数 = -228.6 (dBK)

$$(C/N)_{down} = EIRP_{sat} - FSL_{down} + (G/T)_{RxES} - B_{carrier} - k \text{ (dBW)} \quad [4]$$

$$(C/N)_{down} = P_{Sat} + G(\theta)_{TxSat} - FSL_{down} + G_{RxES} - (T_{ES} + B_{carrier} + k) \text{ (dBW)} \quad [5]$$

其中:

$$C_{down} = P_{Sat} + G(\theta)_{TxSat} - FSL_{down} + G_{RxES} \quad [6]$$

P_{Sat} = 发射卫星功率 (dBW)

$G(\theta)_{TxSat}$ = 对于接收地球站的发射卫星增益 (dBi)

FSL_{down} = 下行链路中的自由空间损耗 (dB) (见等式[7])

G_{RxES} = 地球站的接收增益 (dBi)

T_{ES} = 接收地球站系统噪声温度 (dBK)

$B_{carrier}$ = 载波带宽 (dBHz)

k = 玻尔兹曼常数 = -228.6 (dBK)

2.2 自由空间传输损耗

自由空间传输损耗（FSL）是由于在空间传播信号导致的功率损耗，由下式得出：

$$\text{FSL} = 20(\log f + \log d) + 32.45 \quad (\text{dB}) \quad [7]$$

其中 f : 频率 (MHz)

d : 距离 (km)

地球站和对地静止卫星间的距离 d 由下式所示：

$$d = 42\,644 \sqrt{1 - 0.2954 \cos \psi} \quad \text{km} \quad [8]$$

其中：

$$\cos \psi = \cos \zeta \times \cos \beta \quad [9]$$

其中：

ζ : 地球站的纬度

β : 卫星和地球站间的经度差。

注 – 如果 $\cos \psi < 0.151$ ，则卫星在水平面以下。

两个对地静止卫星间的距离 d_S 确定如下（与信号从一个对地静止卫星传输到另一个对地静止卫星时计算FSL相关）：

$$d_S = 84\,332 \sin \frac{\theta_g}{2} \quad \text{km} \quad [10]$$

其中：

θ_g : 地心角间隔

3 载波干扰比计算

3.1 C/I上行链路

下图示出了地球站与某个卫星通信时引起对相邻卫星的干扰处的上行链路干扰情况。

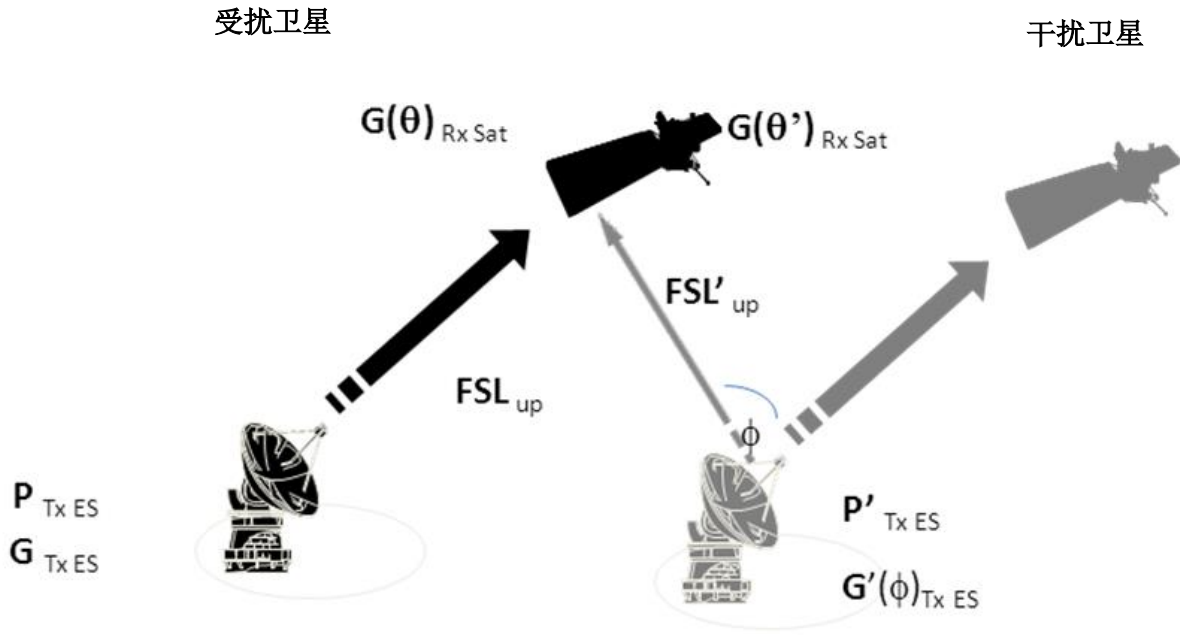


图2 – 上行链路干扰情况

上行链路中的载波干扰比（C/I）由下式得出：

来自公式[3]：

$$\begin{aligned} C_{up} &= P_{Tx ES} + G_{Tx ES} - FSL_{up} + G(\theta)_{Rx Sat} \\ I_{up} &= P'_{Tx ES} + G'(\phi)_{Tx ES} - FSL'_{up} + G(\theta')_{Rx Sat} \end{aligned} \quad [11]$$

其中：

$P'_{Tx ES}$ = 干扰发射地球站功率

$G'(\phi)_{Tx ES}$ = 在受扰空间站方向上干扰发射地球站的旁瓣增益

以及

ϕ = 在干扰发射地球站上的受扰卫星和干扰卫星之间的地心角间隔

FSL'_{up} = 干扰发射地球站的自由空间损耗

$G(\theta')_{Rx Sat}$ = 干扰地球站方向上受扰空间站的接收增益

因此：

$$(C/I)_{up} = (P_{Tx ES} + G_{Tx ES} - FSL_{up} + G(\theta)_{Rx Sat}) - (P'_{Tx ES} + G'(\phi)_{Tx ES} - FSL'_{up} + G(\theta')_{Rx Sat}) \quad [12]$$

3.2 C/I下行链路

下图示出了卫星与某个地球站通信时引起对相邻卫星的接收地球站干扰处的下行链路干扰情况。

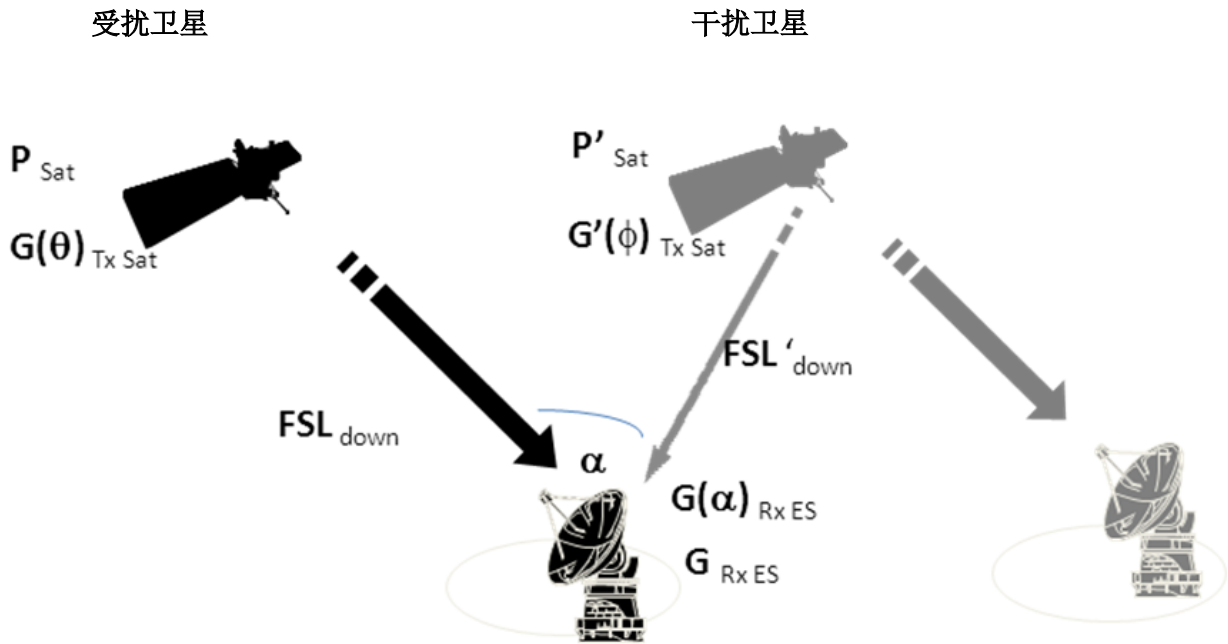


图3 – 下行链路干扰情况

下行链路中的载波干扰比（C/I）由下式得出：

来自公式[6]：

$$\begin{aligned} C_{\text{down}} &= P_{\text{Sat}} + G(\theta)_{\text{TxSat}} - FSL_{\text{down}} + G_{\text{RxES}} \\ I_{\text{down}} &= P'_{\text{Sat}} + G'(\phi)_{\text{TxSat}} - FSL'_{\text{down}} + G(\alpha)_{\text{RxES}} \end{aligned} \quad [13]$$

其中：

- P'_{Sat} = 干扰发射卫星功率
- $G'(\phi)_{\text{TxSat}}$ = 在受扰地球站方向上的干扰发射卫星天线增益
- FSL'_{down} = 干扰发射卫星的自由空间损耗
- $G(\alpha)_{\text{RxES}}$ = 在干扰卫星方向上受扰地球站的旁瓣增益

其中：

α = 在受扰接收地球站上的受扰卫星和干扰卫星之间的地心角间隔

因此，

$$(C/I)_{\text{down}} = (P_{\text{Sat}} + G(\theta)_{\text{TxSat}} - FSL_{\text{down}} + G_{\text{RxES}}) - (P'_{\text{Sat}} + G'(\phi)_{\text{TxSat}} - FSL'_{\text{down}} + G(\alpha)_{\text{RxES}}) \quad [14]$$

3.3 顶心角间隔

两个对地静止卫星的对向夹角称为顶心角间隔。地心角间隔 θ_t 由下式确定：

$$\theta_t = \arccos \left(\frac{d_1^2 + d_2^2 - \left(84\,332 \sin \frac{\theta_g}{2} \right)^2}{2d_1 \cdot d_2} \right) \quad [15]$$

其中：

d_1 和 d_2 = 从地球站分别到两颗卫星的距离（km）（见公式8）

θ_g = 两颗卫星之间的地心角间隔，以度为单位，要考虑经度位置保持的容差。

3.4 天线方向性图

天线旁瓣辐射尽管是无用辐射，但不能消除。天线辐射的特性有主瓣、旁瓣和两者之间的一些过渡区域。有几条辐射包络参考曲线仿照天线辐射方向性图掩模。《无线电规则》附录8中的参考方向性图示例如下所示：

a) 对于 $\frac{D}{\lambda} \geq 100$ （最大增益 ≥ 48 dB左右）：

$$\begin{aligned} G(\varphi) &= G_{\max} - 2.5 \times 10^{-3} \left(\frac{D}{\lambda} \varphi \right)^2 && \text{对于 } 0 < \varphi < \varphi_m \\ G(\varphi) &= G_1 && \text{对于 } \varphi_m \leq \varphi < \varphi_r \\ G(\varphi) &= 32 - 25 \log \varphi && \text{对于 } \varphi_r \leq \varphi < 48^\circ \\ G(\varphi) &= -10 && \text{对于 } 48^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ \end{aligned}$$

其中：

$\left. \begin{array}{l} D: \text{天线直径} \\ \lambda: \text{波长} \end{array} \right\}$ 用同一单位表示

φ : 用度表示的天线主轴偏离角

$$G_1: \text{第1个旁瓣增益} = 2 + 15 \log \frac{D}{\lambda}$$

（如果未给出 $\frac{D}{\lambda}$ ，则可从式 $20 \log \frac{D}{\lambda} \approx G_{\max} - 7.7$ 中估算出来，

其中 $G_{\max}$ 是天线主瓣增益，用dB表示。）

$$\varphi_m = \frac{20\lambda}{D} \sqrt{G_{\max} - G_1} \text{ 度}$$

$$\varphi_r = 15.85 \left(\frac{D}{\lambda} \right)^{-0.6} \text{ 度}$$

b) 对于 $\frac{D}{\lambda} < 100^4$ （最大增益 < 48 dB 左右）：

$$G(\varphi) = G_{\max} - 2.5 \times 10^{-3} \left(\frac{D}{\lambda} \varphi \right)^2 \quad \text{对于 } 0 < \varphi < \varphi_m$$

$$G(\varphi) = G_1 \quad \text{对于 } \varphi_m \leq \varphi < 100 \frac{\lambda}{D}$$

$$G(\varphi) = 52 - 10 \log \frac{D}{\lambda} - 25 \log \varphi \quad \text{对于 } 100 \frac{\lambda}{D} \leq \varphi < 48^\circ$$

$$G(\varphi) = 10 - 10 \log \frac{D}{\lambda} \quad \text{对于 } 48^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$$

其他天线参考方位性图可从以下参考中得出：

- 《无线电规则》附录7的附件3
- ITU-R S.465-6号建议书
- ITU-R S.580-6号建议书
- ITU-R S.1855-0号建议书
- ITU-R M.694-1号建议书
- ITU-R BO.1213-1号建议书
- ITU-R BO.1295号建议书
- ITU-R BO.1900号建议书
- ITU-R BO.2063-0号建议书

4 调整因子

在有用载波中要考虑的干扰载波功率大小可由有用载波带宽和干扰载波带宽之比得出，称之为调整因子。如该术语所示，把根据表达式[12]和[14]进行的C/I计算用调整因子进行调整，得出要考虑的干扰载波功率的值。

在类似噪声的数字载波干扰中，如果有用载波带宽小于干扰载波带宽，在C/I计算中仅考虑一部分干扰载波功率。或者，如果有用载波带宽大于干扰载波带宽，则要考虑多个干扰载波对某个有用载波的影响效果。

在干扰模拟载波的情况下，如果不知道干扰功率频谱，计算干扰时可以用近似法，干扰载波的功率谱密度在有用载波带宽上为常数。等效带宽（ BW_{eqi} ）可以计算如下：

$$BW_{eqi} = \text{总的峰值功率/最大功率密度}$$

在一个TV-FM载波到另一个TV-FM载波的非同频干扰情况下，使用与附录30的附件5中的第3.5.1节和第3.8节相关的，在《程序规则》中规定的保护比掩模。

计算干扰功率的三种方法可以归纳为下表所示：

表1
调整因子情况

有用干扰	数字	模拟 (非TV/FM)	其他	TV/FM
数字	方法1: 有用带宽与干扰带宽重叠率调整			
TV/FM	方法2: 有用带宽与干扰等效带宽重叠率调整			方法1: 同频
模拟 (非TV/FM)				方法3: 非同频 (相关保护比)
其他				方法2

5 发现C/I要求

用于数字和非电视模拟载波的单入干扰 (SEI) 保护标准用C/N目标值表示, k值为12.2或14 dB, 概括如下:

干扰载波 类型 有用载 波类型	数字	模拟 (非TV-FM)
模拟 (TV-FM)	$C/N + 14$ (dB)	
数字	$C/N + 12.2$ (dB)	
模拟 (非TV-FM)	$C/N + 12.2$ (dB)	
其他	$C/N + 14$ (dB)	

在干扰载波类型模拟TV-FM情况或除数字和非TV-FM之外的载波类型情况下，其保护标准概括如下：

有用载波类型 \ 干扰载波类型	模拟（TV-FM）或其他
模拟（TV-FM）	$C/N + 14 \text{ (dB)}$
数字	如果 $BW_w \leq BW_{eqi}$ ，则 $C/N + 5.5 + 3.5 \cdot \log(BW_w) \text{ (dB)}$
	否则 $BW_w > BW_{eqi}$ 则 $C/N + 12.2 \text{ (dB)}$
模拟（非TV-FM）	$11.4 + 2 \cdot \log(BW_w) \text{ (dB)}$
其他	$11.4 + 2 \cdot \log(BW_w) \text{ (dB)}$

其中：

BW_w ：有用载波的必要带宽（MHz）

BW_{eqi} ：干扰载波的等效带宽（MHz）

C/N ：载噪比（dB）

在《程序规则》B部分第B3节中，使用发射类别把载波类型进行分类：（附录4的附件2项目C.7）：

- 模拟信号（TV-FM）：
当发射类型定义为（同附件2的C.7.a至附录4）“F”，即为第一种特性，若发射类型定义为“F”或者“W”，即为第三种特性。
- 模拟信号（除TV-FM外的其他信号）：
当发射类型的第一种特性定义为“F”而第三种特性却不是“F”或者“W”时。
- 数字信号：
当发射类型的第一种特性定义为“G”时。
- 其他：
当发射类型的第一种特性不是“F”或者“G”时。

6 额外余量

ITU-R S.741-2建议书表2规定“ C/N ”为“载波功率与总噪声功率，包括所有内部噪声和来自其他系统的干扰之比”。

因此，要符合这一定义，除非已提交的C/N指标中已经包含一个系统间噪声余量，否则在根据主管部门提供的内部系统噪声值计算出的余量上，还要附加一个额外余量，对于有用模拟电视发射，该值为0.46 dB，对于其他有用发射为1.87 dB。有关这些余量的阐述见程序规则B3节后附资料2。

7 选择最差情况位置

为了获得最坏情况C/I，地球站位置选择如下：

上行链路

有用地球站位于有用接收波束服务区域边缘处。干扰地球站位于干扰接收波束的服务区内，并处于从有用接收波束获得的最高增益处。

下行链路

有用地球站位于有用发射波束服务区的边缘处，并处于从干扰发射波束获得的最高增益处。

8 简化计算的假设

由于顶心角和地心角值的差异很小，在计算时使用地心角取代顶心角能够获得相当精确的C/I结果。另外，在共享相同频段的不同路径上传输的信号引起的自由空间损耗差异也很小。根据这些假设，公式[12]和[14]的C/I计算简化如下：

来自等式[12]：

$$(C/I)_{up} = (P_{TxES} + G_{TxES} - FSL_{up} + G(\theta)_{RxSat}) - (P'_{TxES} + G'(\phi)_{TxES} - FSL'_{up} + G(\theta')_{RxSat})$$

用 ϕ_g 取代 ϕ ，并假设 $FSL_{up} = FSL'_{up}$

$$(C/I)_{up} = (P_{TxES} + G_{TxES} - FSL_{up} + G(\theta)_{RxSat}) - (P'_{TxES} + G'(\phi_g)_{TxES} - FSL'_{up} + G(\theta')_{RxSat})$$

$$(C/I)_{up} = (P_{TxES} + G_{TxES} + G(\theta)_{RxSat}) - (P'_{TxES} + G'(\phi_g)_{TxES} + G(\theta')_{RxSat})$$

其中：

ϕ_g = 在干扰发射地球站处受扰卫星和干扰卫星间的地心角间隔

同样在下行链路中，由下式可得出相当精确的C/I计算结果：

$$(C/I)_{down} = (P_{Sat} + G(\theta)_{TxSat} + G_{RxES}) - (P'_{Sat} + G'(\phi)_{TxSat} + G(\alpha_g)_{RxES}) \quad [14]$$

其中：

α_g = 在受扰接收地球站处受扰卫星和干扰卫星间的地心角间隔